

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
“DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN
POR MCSA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE HILBERT”**

**AUTOR:
OMAR OSWALDO RAMOS CONTERO**

**TUTOR:
MSc. RAMÓN ENRIQUE PÉREZ PINEDA**

Quito, Diciembre 2016

Omar Oswaldo Ramos Contero

**DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN
POR MCSA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE HILBERT**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2016

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Omar Oswaldo Ramos Contero

Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingenierías

Universidad Politécnica Salesiana

oramos@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Ramón Enrique Pérez Pineda

MSc. Scientiarum en Ingeniería Eléctrica, Estudiante de
Doctorado en ciencias de la Ingeniería.

Docente de la Universidad Politécnica Salesiana

Facultad de Ingenierías

rperezp@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2016 Universidad Politécnica Salesiana

Quito – Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Ramón Enrique Pérez Pineda declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Diagnóstico de fallas incipientes en motores de inducción por MCSA utilizando la transformada de Hilbert*” realizado por Omar Oswaldo Ramos Contero, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Diciembre 2016



.....
Ramón Enrique Pérez Pineda

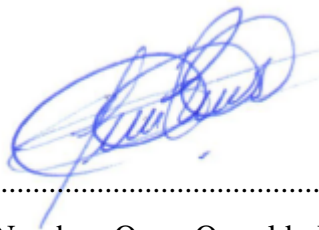
Cédula de identidad: 0959948290

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Omar Oswaldo Ramos Contero, con documento de identificación N° 172440116-9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos *patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Diagnóstico de fallas incipientes en motores de inducción por MCSA utilizando la transformada de Hilbert”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....
Nombre: Omar Oswaldo Ramos Contero

Cédula: 172440116-9

Fecha: Quito, Diciembre 2016

AGRADECIMIENTO

En este momento tan importante, en el cual he logrado dar un paso más en los escalones de mi vida, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de ser parte de este mundo, agradezco a mis padres que día a día con su esfuerzo, ejemplo y constancia me han enseñado a luchar, a ser una persona de bien, formándome con reglas y algunas libertades, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos; a mis hermanas que en ciertos momentos soportaron mi mal genio y sin embargo estuvieron presentes para calmarme, a mi familia en general ya que su ayuda fue como un granito de arena que formó parte de este gran logro.

Quiero agradecer a mi novia Cris Bombón, por su apoyo incondicional, por estar conmigo en los buenos y malos momentos durante el transcurso de esta hermosa experiencia, sus consejos y su ayuda me han dado la fuerza para continuar.

Agradezco a todos los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana que he conocido en cada etapa de mi vida estudiantil por compartir sus conocimientos e impulsarme a aprender más.

Agradezco a mi tutor MSc. Ramón Pérez Pineda por su apertura y constancia durante la realización de este trabajo de titulación, sus conocimientos y orientación, han sido parámetros fundamentales para el desarrollo y culminación de este artículo académico.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	2
2. MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR PARA DETECTAR FALLAS INCIPIENTES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN....	3
2.1. Fundamentos del MCSA.	4
3. REPRESENTACIÓN DE LOS MODELOS DEPENDIENTES DE LAS FALLAS INCIPIENTES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	4
3.1. Falla ocasionada por barras rotas en el rotor.....	4
3.2. Falla ocasionada por excentricidad.	5
3.3. Falla ocasionada por cojinetes dañados.	5
3.4. Falla ocasionada por espiras cortocircuitadas de la misma fase.	6
4. ALGORITMO DE HILBERT COMO MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR.....	6
4.1. Algoritmo de la Transformada de Hilbert.....	7
4.2. Método de simulación y descarga de datos.....	8
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LABORATORIO	9
6. CONCLUSIONES.....	15
7. REFERENCIAS	15
8. ESTADO DEL ARTE	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de la instalación de prueba del motor de inducción.	3
Figura 2. Banco de ensayos.....	9
Figura 3. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 1 sin fallas.	9
Figura 4. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 2 sin fallas.	9
Figura 5. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 3 sin fallas.	9
Figura 6. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 sin fallas.	10
Figura 7. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 2 sin fallas.	10
Figura 8. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 3 sin fallas.	10
Figura 9. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por cortocircuito entre espiras.	10
Figura 10. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por excentricidad.	11
Figura 11. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por cojinetes dañados.	12
Figura 12. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 1 sin fallas.	13
Figura 13. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 2 sin fallas.	13
Figura 14. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 3 sin fallas.	13
Figura 15. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 sin fallas.	13
Figura 16. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 2 sin fallas.	13
Figura 17. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 3 sin fallas.	13
Figura 18. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por barras rotas.	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferencia entre amplitud y bandas laterales.	5
Tabla 2. Características del primer motor bajo estudio.....	9
Tabla 3. Características del segundo motor bajo estudio.	9
Tabla 4. Frecuencias de falla de cortocircuito entre espiras.	10
Tabla 5. Componentes de frecuencia del motor sano.	11
Tabla 6. Frecuencias de falla del motor con espiras cortocircuitadas.....	11
Tabla 7. Frecuencias de falla de excentricidad.	11
Tabla 8. Componentes de frecuencia del motor sano.	12
Tabla 9. Frecuencias de falla del motor con excentricidad.	12
Tabla 10. Frecuencias de falla por cojinetes dañados.	12
Tabla 11. Componentes de frecuencia del motor sano.	12
Tabla 12. Frecuencias de falla del motor con cojinetes dañados.	12
Tabla 13. Frecuencias de falla por barras rotas del rotor.	14
Tabla 14. Componentes de frecuencia del motor sano.	14
Tabla 15. Frecuencias de falla del motor con barras rotas en el rotor.	14
Tabla 16. Magnitudes obtenidas de la diferencia entre la amplitud fundamental y las bandas laterales.	14
Tabla 17. Matriz de estado del arte	18
Tabla 18. Resumen e Indicadores del estado del arte	21

DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN POR MCSA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE HILBERT

Resumen.

En la actualidad, los motores de inducción, debido a su amplia gama y diversas aplicaciones, son las máquinas más utilizadas en la industria, fábricas y edificaciones de gran potencial que requieran mover, elevar o transportar cualquier tipo de material, por su facilidad de instalación y robustez; es por este motivo que la detección de fallas incipientes es muy importante, fallas como: cortocircuito entre espiras de la misma fase, cojinetes dañados, excentricidad y barras rotas del rotor, permitiendo evitar paros imprevistos mediante la realización de mantenimientos preventivos. En el presente trabajo se busca diagnosticar las fallas incipientes que se pueden producir en los motores de inducción mediante el método de análisis de la corriente del motor (MCSA, por sus siglas en inglés), método en el cual se analiza la corriente de las tres fases y, mediante la transformada de Hilbert se convierte la corriente obtenida en función del tiempo a función de la frecuencia para proceder con el análisis, comparando con patrones previamente establecidos y determinar qué tipo de falla puede estar produciéndose en el motor. Para realizar la experimentación, se utilizaron dos motores de inducción, realizando las primeras tres fallas en un motor de 3HP y la falla restante en un motor de 1.5HP.

Palabras Clave: motores de inducción, fallas incipientes, excentricidad, barras rotas del rotor, cojinetes, transformada de Hilbert.

Abstract.

At present, the induction motors are the most used machine in the industry for their broad range and diverse applications. Factories and buildings of great potential that require to move, lift or transport any type of material, are using these type of machines because of its ease of installation and robustness. It is the reason why the detection of incipient faults is very important, incipient faults such as: breakdown voltage between turns of the same phase damaged bearings, eccentricity and broken rotor bars, allowing to avoid unplanned shutdowns by performing preventive maintenance and thus extending the life of the engine. The present paper seeks to diagnose the incipient faults that may occur in the induction motors using the Motor Current Signature Analysis (MCSA for its acronym in English), method in which the current of the three phases is analyzed and using the Hilbert transform, the current obtained is transformed from a function of time to a function of frequency. This action let us to determine what type of fault could happen in the engine, and take the necessary measures to control it. In order to perform the experiment, two induction motors were used. The first three failures with a 3 HP motor and the remaining failure with a 1.5 HP motor.

Keywords: induction motors, incipient faults, eccentricity, broken rotor bars, bearings, Hilbert transform.

1. Introducción

Hoy en día, en la mayor parte de las industrias y fábricas modernas alrededor de todo el mundo, muchas de las tareas que se desempeñan son desarrolladas por medio de motores de inducción, los cuales son de gran importancia debido a que representan una herramienta fundamental por su rendimiento óptimo[1], amplia gama y diversos usos, ya que son dispositivos de conversión de energía electromecánica que pueden ser utilizados en una infinidad de procesos como transportación, manufactura, dispositivos elevadores, equipos medicinales, entre otros[2][3]. En países industrializados, estas máquinas consumen entre el 40% y 50% de la energía eléctrica total generada[4] además son componentes indispensables que frecuentemente se acoplan a equipos para el desarrollo de actividades puntuales que en el mercado industrial han tomado gran importancia; dichos equipos al tener como componentes motores de inducción, proporcionan capacidades básicas indispensables para cualquier proceso ya sea industrial o de menor complejidad, por lo cual un correcto trabajo, un eficaz desempeño y un excelente producto final, asegurarán el éxito empresarial[5]. Es por este motivo que los motores de inducción deben funcionar de un modo eficiente, controlando aspectos primordiales como la seguridad, fiabilidad y rendimiento[6], para lo cual es indispensable realizar un seguimiento, evaluación y monitoreo durante toda la vida útil de sus componentes. Para ello se han creado diversas técnicas de monitoreo y herramientas para verificar su funcionamiento y de esta manera asegurar un alto grado de fiabilidad durante el tiempo de actividad; sin embargo, muchas empresas todavía tienen problemas con la detección oportuna de fallas incipientes que provocan un daño completo del motor. ocasionando un paro

de la producción y un golpe en la economía de la empresa[6].

Entre los aspectos relevantes que pueden ocasionar fallos en los motores se encuentra el medio ambiente en el cual se desempeñan, instalación inadecuada, problemas con las condiciones de trabajo, es decir sobrecargas, o fallas de fábrica; dichos fallos pueden ocasionar un paro repentino e imprevisto de la producción, también pueden ser perjudiciales para el personal que está en contacto continuo con los motores, ya que giran a elevadas velocidades, muchas veces con una carga considerable[7]. Las fallas incipientes en los motores de inducción, representan entre un 40% a 50% del total de fallas existentes[8][9]; dichas fallas se clasifican en barras rotas del rotor, excentricidad en el entrehierro, cojinetes dañados y cortocircuito entre espiras de la misma fase[10]. El objetivo de los esquemas de detección y diagnóstico de fallas incipientes es proporcionar advertencias avanzadas de las fallas, para que se puedan tomar acciones correctivas y de esta manera prevenir pérdidas económicas o riesgos para el personal que manipula los motores[11]. Durante las últimas décadas, se han desarrollado nuevas técnicas de detección de fallas y se han creado diagnósticos basados en modelos[12][13]. Independientemente del proceso que se utilice, la detección de fallas en el motor de inducción se puede complicar debido al nivel de carga al cual está sometido[14], debido a que los componentes espectrales de la amplitud y las frecuencias relacionadas con la carga del motor varían significativamente[15]; como consecuencia, los componentes de fallo dentro del espectro de frecuencia cambian su ubicación con el deslizamiento del motor y pueden ubicarse junto a componentes con amplitudes más altas. La utilización de los motores de inducción es muy variada y el diagrama esquemático de conexiones para evaluar la presencia de fallas de inducción se puede observar en la Figura 1.

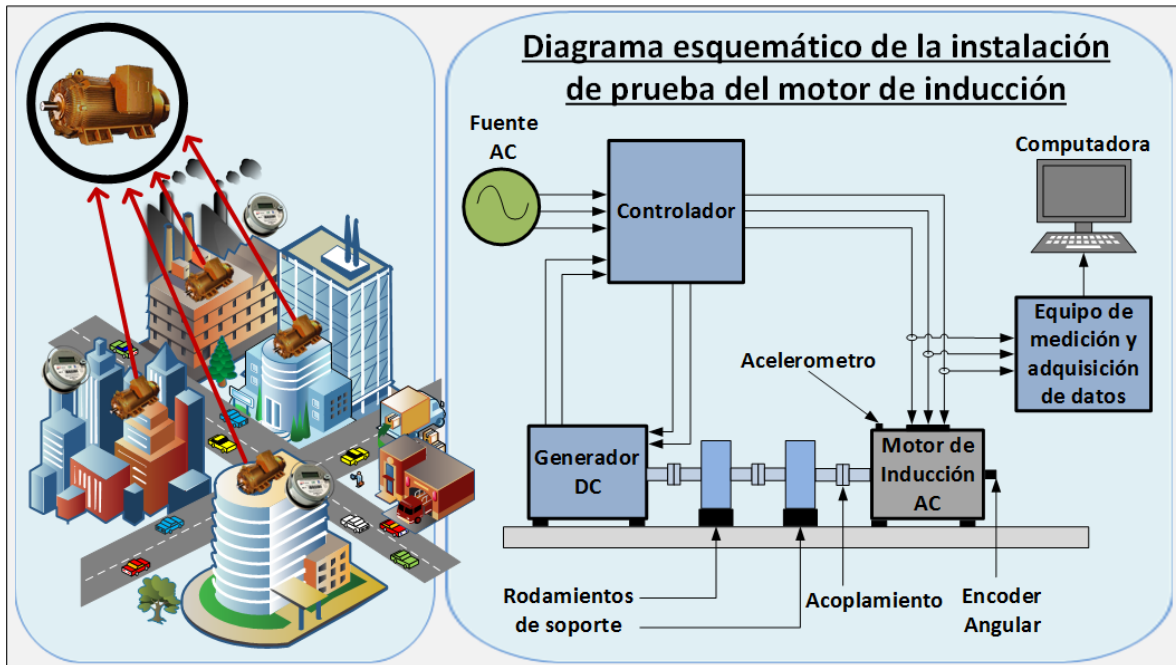


Figura 1. Diagrama esquemático de la instalación de prueba del motor de inducción.

En adelante el artículo se desarrolla de la siguiente manera: en la sección II se introduce a la descripción del método de Análisis de la Señal de Corriente del Motor (MCSA por sus siglas en inglés) para detectar fallas incipientes en los motores de inducción y sus fundamentos. En la sección III se describen los modelos de las fallas incipientes que se producen en los motores de inducción. La sección IV contiene la formulación matemática del problema y el pseudocódigo del algoritmo donde se propone usar la transformada de Hilbert para el análisis de fallas. En la sección V se describen e interpretan los resultados tras la toma de datos del motor. Finalmente se presentan las conclusiones del artículo en la sección VI.

2. Método de análisis de la señal de corriente del motor para detectar fallas incipientes del motor de inducción

El método de Análisis de la Señal de Corriente del Motor (MCSA, por sus siglas en inglés), es un método que se deriva de una clase más amplia llamada Análisis de Firma Eléctrica,

(ESA, por sus siglas en inglés) en el cual se utiliza al motor como un transductor; haciendo un estudio y análisis de la corriente que circula por él, se analiza el espectro de frecuencia de la corriente con el objetivo de detectar componentes espectrales específicos de las fallas incipientes del motor, y en caso de sufrir una falla, decidir si continúa o no en funcionamiento. Es un método que generalmente hace una representación frecuencial de la corriente y es sensible a las variaciones de carga[15][16], cumple con la monitorización de la condición de la máquina por medio de la amplitud del componente frecuencial de la falla y la ubica dentro del espectro; el modelo es determinado mediante expresiones analíticas en las cuales intervienen parámetros característicos básicos del motor como el número de polos del estator, frecuencia de la red de alimentación y el deslizamiento del rotor relacionado con la carga que se le aplique al motor [17].

El MCSA permite realizar un monitoreo no invasivo a la máquina, es decir, mientras el motor está en funcionamiento y de manera remota con respecto del equipo que se está

monitoreando; después de realizar el análisis, los resultados obtenidos se relacionan con la falla que pudiera presentar el motor. El método de análisis del MCSA se puede aplicar a máquinas de grandes potencias, así como también a máquinas de potencias pequeñas[18]. Con todas las características anteriormente mencionadas, este método proporciona un alto grado de sensibilidad, selectividad y rentabilidad.

Las fallas incipientes que serán analizadas mediante éste método tienen los siguientes porcentajes de ocurrencia: falla por barras rotas un 10%, falla por excentricidad un 12%, falla por cortocircuito entre espiras de la misma fase un 37% y fallas en los cojinetes un 41%[19].

2.1. Fundamentos del MCSA.

El método de análisis de la corriente del motor se fundamenta en el hecho de que al motor de inducción se lo puede tratar como si fuera un transductor que está en continuo funcionamiento, debido a que se pueden detectar variaciones de carga o variaciones mecánicas durante su funcionamiento. Para poder analizar las variaciones, éstas serán tratadas como marcas y posteriormente convertidas en señales distintivas perceptibles en la corriente de alimentación del motor, para lo cual, se deberá tomar una muestra de la corriente de alimentación durante un período de tiempo, la misma que será obtenida de manera segura y confiable a través de métodos no invasivos. Por último la muestra será procesada y analizada para determinar el estado y la condición del motor que en el presente trabajo se realizará en función de la frecuencia[20].

El MCSA consiste en el análisis y detección de los armónicos de la corriente a la que corresponden determinadas frecuencias características de cada tipo de falla, como ejemplo podemos citar a la rotura de barras que causa una asimetría en el rotor, dicha asimetría a su vez causará una distorsión del rotor que modificará la corriente, generando un cambio en la Fuerza Magnetomotriz del rotor (MMF, por sus siglas en inglés)[21].

Para que el método sea implementado de forma exitosa es necesario que se cumplan 5 aspectos: tener un conocimiento elemental acerca del motor, sus partes y funcionamiento; adquirir adecuadamente las señales de corriente; analizar las señales adquiridas mediante un analizador de redes y expresar la señal en función de la frecuencia; los operadores encargados deben tener un nivel de conocimientos basados en su experiencia para definir con eficacia los criterios de gravedad de la falla, y por último, posterior al diagnóstico el operador debe decidir inteligentemente si separa a la máquina de funcionamiento o programa un mantenimiento[22].

3. Representación de los modelos dependientes de las fallas incipientes en los motores de inducción

3.1. Falla ocasionada por barras rotas en el rotor.

La falla ocasionada por la existencia de barras rotas en el rotor se origina en aquellas partes del rotor que no están soportadas por el cuerpo del mismo, es decir se concentran en la parte de la unión del anillo de cortocircuito o cerca del mismo, es en éstas partes donde se acumulará la mayor tensión mecánica de toda la estructura mientras esté funcionando el motor, principalmente durante el proceso de frenado y de aceleración del mismo. En caso de que el motor tenga que sufrir cambios bruscos de velocidad de giro debido a ciclos de trabajo, o cambios de torque debido al tipo de carga o al incremento o decremento de la misma, los materiales se van a fatigar y la falla será cada vez más notoria.

Para que una barra se rompa, primero se agrieta, es decir, se produce un proceso degenerativo hasta llegar a romperse, cuando esto sucede las barras vecinas que se encuentran próximas a la barra rota, comenzarán a soportar más presión y corriente, y a realizar un mayor esfuerzo mecánico y térmico, lo que llevará a que ellas

también inicien un proceso de agrietamiento y su posterior ruptura.

Armónicos en la corriente del estator aparecerán como consecuencia de la presencia de barras rotas produciendo una asimetría del rotor, lo que llevara a generar un campo rotatorio que causará la aparición de frecuencias características, que son valores de frecuencia en los cuales posiblemente existen picos particulares de la corriente en función de la frecuencia propios de la falla, dichos valores se pueden notar en las curvas de la corriente en función de la frecuencia y se obtienen según la ecuación 1:

$$f_b = f_1(1 \pm 2ks) \quad (1)$$

La presencia de barras rotas origina bandas laterales ubicadas a frecuencias del doble del doble del valor de la frecuencia de deslizamiento ($2sf_1$) alrededor de la frecuencia fundamental f_1 [2].

Donde:

f_1 : Frecuencia de alimentación.

s : Deslizamiento en por unidad.

k : Valor entero (1,2,3,4...) su valor depende la banda de frecuencia que se desea obtener, mientras la misma esté más alejada de la frecuencia fundamental el valor de k se incrementará.

El deslizamiento se obtiene mediante la ecuación 2:

$$s = \frac{Ns - Nr}{Ns} * 100\% \quad (2)$$

Donde:

s : Deslizamiento en valor porcentual.

Ns : Velocidad sincrónica.

Nr : Velocidad de rotación del motor.

Para determinar si la curva de corriente en función de la frecuencia obtenida a través de la aplicación de la transformada de Hilbert corresponde a una falla de barras rotas del rotor, corresponde la valor obtenido de la resta de la magnitud del armónico fundamental y de los armónicos obtenidos que se encuentran entre las bandas laterales[2][23]. En la Tabla 1[24] se puede observar la diferencia entre amplitud y bandas laterales.

Tabla 1. Diferencia entre amplitud y bandas laterales.

Diferencia entre amplitud fundamental y bandas laterales (dB)	Estado del motor
54-60	Motor en estado excelente
48-54	Motor en estado bueno
42-48	Presencia probable de barras rotas
36-42	Motor con barras rotas
30-36	Motor con barras rotas y otra fuente de fallo
<30	Motor con daño severo

3.2. Falla ocasionada por excentricidad.

Los fallos que se producen en los motores trifásicos de inducción por excentricidad en el entrehierro, ocurren cuando no existe una perfecta alineación entre los centros del rotor y del estator, estos fallos ocurren debido a que los motores son fabricados con un tamaño muy reducido del entrehierro, existiendo así dos tipos de excentricidades: estática y dinámica.

Las causas que dan lugar a fallos producidos por excentricidad son desgastes en cojinetes, torcedura del eje e irregularidades en el rotor; por otro lado las consecuencias en la máquina son vibraciones en la dirección axial como radial y la aparición de armónicos de alta y baja frecuencia en la corriente del estator, lo cual se expresa mediante la ecuación 3[25]:

$$f_{ec} = f_1 \left[k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

f_1 : Frecuencia de alimentación.

k : Valor entero (1,2,3,4...) su valor depende la banda de frecuencia que se desea obtener, mientras la misma esté más alejada de la frecuencia fundamental el valor de k se incrementará.

p : Número de pares de polos del motor.

s : Deslizamiento en tanto por uno.

3.3. Falla ocasionada por cojinetes dañados.

Los fallos producidos por cojinetes dañados son los que ocurren con mayor frecuencia en los motores trifásicos de inducción, éstos son las

piezas donde se apoyan los extremos del eje, están expuestos a una fricción y movimiento continuo y a las vibraciones que tenga el motor. Si las vibraciones son fuertes, dañarán los cojinetes. Si éstos llegan a presentar un fallo, recaerá en vibraciones del rotor y por ende existirá una excentricidad en el entrehierro, dependiendo de la parte del cojinete en la cual se produzca la falla, se utilizará una de las ecuaciones (4), (5) o (6)[23].

Falla en bolas.

$$F_b = \frac{d_r}{d_b} * f_{rm} * [1 - \left(\frac{d_b}{d_r} * \cos \beta\right)^2] \quad (4)$$

Falla en pista externa.

$$F_e = \frac{n}{2} * f_{rm} * [1 - \left(\frac{d_b}{d_r} * \cos \beta\right)] \quad (5)$$

Falla en pista interna.

$$F_i = \frac{n}{2} * f_{rm} * [1 + \left(\frac{d_b}{d_r} * \cos \beta\right)] \quad (6)$$

Donde:

F_b : Frecuencia característica de falla en bolas.

F_e : Frecuencia característica de falla en pista externa.

F_i : Frecuencia característica de falla en pista interna.

d_r : Diámetro del rodamiento.

d_b : Diámetro de las bolas.

f_{rm} : Frecuencia de rotación del motor.

β : Ángulo de contacto entre pista y bolas del rodamiento.

n : Número de bolas.

Una vez obtenida la frecuencia característica de falla en determinado componente del cojinete, se producirá una vibración en el entrehierro que ocasionará componentes espectrales que serán perceptibles en la corriente de estator, expresado en la ecuación (7).

$$F_{fr} = f_e \pm k * f_f \quad (7)$$

Donde:

F_{fr} : Frecuencia característica de fallas en rodamientos.

k : Valor entero (1,2,3,4...) su valor depende la banda de frecuencia que se desea obtener, mientras la misma esté más alejada de la frecuencia fundamental el valor de k se incrementará.

f_f : Cada tipo de defecto: falla en pista externa, pista interna y en bolas.

f_e : Frecuencia eléctrica de la red de alimentación.

3.4. Falla ocasionada por espiras cortocircuitadas de la misma fase.

Por último la falla causada por espiras cortocircuitadas de la misma fase, es una de las más críticas debido a que esta falla comienza con un pequeño cortocircuito imperceptible, pero que con el tiempo se va tornando más severo, pudiendo producir un daño permanente en las espiras del motor, esta falla causará una modificación en el circuito eléctrico cambiando la densidad del flujo. Las frecuencias armónicas causadas están expresadas mediante la ecuación (8) y (9)[19]:

Intervalo de frecuencias de 400 Hz a 2000 Hz:

$$f_{sth} = f_1 \left[1 \pm m z_2 \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (8)$$

Frecuencias por debajo de 400 Hz:

$$f_{stl} = f_1 \left[\frac{m}{p} (1-s) \pm k \right] \quad (9)$$

Donde:

Z_2 : Número de ranuras o barras del rotor.

k : Valor entero (1,2,3,4...) su valor depende la banda de frecuencia que se desea obtener, mientras la misma esté más alejada de la frecuencia fundamental el valor de k se incrementará.

m : Número entero positivo (1,2,3,4...).

p : Número de pares de polos del motor.

4. Algoritmo de Hilbert como método de análisis de la señal de corriente del motor

La transformada de Hilbert tiene varios usos en ambientes prácticos que se presentan en la vida

cotidiana, entre los cuales sobresale su utilidad para poder analizar una determinada señal y descomponer o calcular su contenido en frecuencia; de este modo se pueden desarrollar filtros selectivos para separar señales según su contenido en frecuencia, dicho proceso adopta el nombre de discriminación por frecuencia. Otro proceso con el mismo objetivo, es aquel que está basado en la selectividad de fase, o también llamado discriminación en fase, proceso que desfase señales determinadas con la finalidad de que se puedan separar fácilmente. El caso más sencillo y de fácil comprensión es aquel que consiste en desfase una señal en 180° , respuesta que se logra multiplicando por (-1) a la señal, o invirtiendo su polaridad; otro desfase particular y de gran importancia es el que abarca $\pm 90^\circ$; a una señal de frecuencias positivas se le asigna un desfase de $+90^\circ$, mientras que a una de frecuencias negativas el desfase es de -90° , cuando la señal ha sido desfasada en $\pm 90^\circ$, la señal resultante se denomina transformada de Hilbert de la señal[26]. En primer lugar, una señal analítica se introduce mediante la adición de la parte imaginaria con la señal de valor real[27], en segundo lugar, el valor absoluto de la señal analítica se utiliza para encontrar el rango y finalmente mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) se determina el espectro del rango. En caso de motores en condiciones sin fallos sólo un único pico aparecerá, denominado frecuencia fundamental, mientras que en caso de fallas presentes, aparecerán picos en bandas laterales cerca del espectro fundamental [28].

Sea la siguiente señal $g(t)$ cuya transformada de Fourier es $G(f)$. La transformada de Hilbert de la señal $g(t)$ viene dada por la ecuación (10).

$$\hat{g}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

Debido a que es una integral impropia para $t - \tau$ existe una singularidad en el integrando; para poder resolver este inconveniente, se calculará en forma simétrica en torno a $t - \tau$ según la ecuación (11).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{t-\epsilon} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau + \int_{t+\epsilon}^{+\infty} \frac{i(\tau)}{t - \tau} d\tau \right] \quad (11)$$

La transformada inversa de Hilbert se define mediante la ecuación (12).

$$g(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{g}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (12)$$

$g(t)$ y $\hat{g}(t)$ constituyen un par transformado de Hilbert.

De la definición de la transformada de Hilbert $\hat{g}(t)$ se interpreta como una convolución según la ecuación (13).

$$\hat{g}(t) = g(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (13)$$

Por otro lado la transformada de Fourier de $\frac{1}{\pi t}$ es la función de transferencia representada por $-j \operatorname{sgn}(f)$ donde f es la función a ser analizada; mediante la convolución en el dominio del tiempo de la transformada de Fourier, la transformada de Fourier de $\hat{g}(t)$ se expresa mediante $\hat{G}(f)$ a través de la ecuación (14).

$$\hat{G}(f) = -j \operatorname{sgn}(f) G(f) \quad (14)$$

Por lo visto anteriormente, se puede calcular la transformada de Hilbert de una señal $g(t)$ tratándola como si fuera un sistema Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI, por sus siglas en inglés), con respuesta al impulso $\frac{1}{\pi t}$ o con su equivalente función de transferencia $-j \operatorname{sgn}(f)$ [26][29][30].

4.1. Algoritmo de la Transformada de Hilbert

Este algoritmo basa su principio de funcionamiento en la importación y análisis de los datos de corriente de las fases obtenidas del motor de inducción, se asignan los valores de la frecuencia de muestreo y de las variables que intervendrán en cada una de las fórmulas de cada falla, que determinarán el rango de frecuencia donde pueden aparecer las mismas, se aplica la transformada de Hilbert a los datos

importados para obtener las curvas que serán procesadas y analizadas.

A continuación se detalla el algoritmo utilizado en el modelo:

Algoritmo de la transformada de Hilbert para la detección de fallas en motores de inducción.

Paso1: INICIO ALGORITMO DE HILBERT

Paso2: DECLARACIÓN

INICIO: f_1 ; k ; s ; p ; d_r ; d_b ; f_{rm} ; β ; f_e ; f_f ; m ;
falla;

SALIDA: f_b ; f_{ec} ; F_b ; F_{fr} ; f_{stl} ;

Paso3: ASIGNACIÓN

$f_1=60$;
 $p=2$;
 $m=1:10$;
 $d_r=4.5$;
 $d_b=0.7$;
 $f_{rm}=59.87$;
 $\beta=\pi/6$;

Paso4: PROCESO

```

if (falla=barras) then
     $k=1:87$ ;
     $s=0.8556$ ;
     $f_b = f_1(1 \pm 2ks)$ ;
else
if (falla=excentricidad) then
     $k=1:30$ ;
     $s=0.0022$ ;
     $f_{ec} = f_1 \left[ k \left( \frac{1-s}{p} \right) \right]$ ;
else
if (falla=cojinetes) then
     $s=0.0022$ ;
     $k=1:87$ ;
     $F_b = \frac{d_r}{d_b} * f_{rm} * [1 - \left( \frac{d_b}{d_r} * \cos \beta \right)^2]$ ;
     $F_{fr} = f_e \pm k * f_f$ ;
else
if (falla=cortocircuito) then
     $s=0.0022$ ;
     $k=1:19$ ;
     $f_{stl} = f_1 \left[ \frac{m}{p} (1 - s) \pm k \right]$ ;
end
Transformada de Hilbert
TransformadaHilbert=hilbert(datosImportados)
Estimación de la densidad espectral de:
potencia/frecuencia (dB/Hz)
pxx = pwelch(x)

```

Paso5: VISUALIZAR

Se grafica la densidad espectral de potencia de acuerdo a los límites del **Paso 4**.

Paso6: FIN ALGORITMO DE HILBERT

4.2. Método de simulación y descarga de datos

Para realizar la obtención y el análisis de los resultados, se construyó un banco de ensayos con el objetivo de simular cada una de las diferentes fallas. El motor se puso en marcha mediante el uso de módulos de energía trifásicos, la lectura de datos de corriente en función del tiempo se registró mediante un analizador de redes, posteriormente los datos obtenidos se trasladaron al computador en una hoja de EXCEL para su posterior estudio mediante la herramienta matemática MATLAB, en la cual se desarrolló un algoritmo representando la Transformada de Hilbert, esta permitió la interpretación de los resultados llevando los datos obtenidos de corriente en función del tiempo a su configuración en función de la frecuencia. Por último se analizaron e interpretaron los resultados obtenidos.

Para comenzar el estudio primero se realizó un seguimiento y toma de datos del motor funcionando en condiciones normales siguiendo el proceso mencionando en el párrafo anterior, esto sirvió como punto de partida para identificar las variaciones que se producen a medida que las fallas van ocurriendo; posteriormente se analizó la primera falla incipiente causada por cortocircuito entre espiras de la misma fase.

El proceso de análisis para la falla ocasionada por excentricidad se realizó mediante la colocación de pesos en los extremos de las barras del rotor, por otro lado para el análisis de fallas ocasionadas por cojinetes dañados, se reemplazó uno de los cojinetes, o también llamados rodamientos, de los extremos del rotor, por uno de las mismas características pero con dificultades en su giro debido al desgaste en las bolas del rodamiento por impurezas en su interior.

En la Figura 2 se observa el banco de ensayos con el analizador de redes para la toma de datos.



Figura 2. Banco de ensayos.

5. Interpretación de resultados de laboratorio

En primer lugar se mostrará los resultados obtenidos con el motor operando en condiciones normales de funcionamiento sin presentar fallas, posteriormente de cada falla estudiada se presentará el resultado característico el cual será comparado con los resultados de las primeras gráficas y, siguiendo las normas estudiadas, se establecerá un análisis e interpretación de las frecuencias características que establecen la presencia o ausencia de las fallas incipientes. Se utilizaron dos motores, el primero para analizar las fallas que corresponden a cortocircuito entre espiras, excentricidad y cojinetes dañados y el segundo para representar la falla ocasionada por barra rotas del rotor. En las Tablas 2 y 3 se muestra las características de los motores bajo estudio.

Tabla 2. Características del primer motor bajo estudio.

MOTOR 3Ø	ELECTROMOTORES WEG S.A.				WEG
MOD. QR D20	3 Hp	60 Hz	Fs. 1.15	CODE H	2 Polos
V. 220/380V	A. 9/5.2A	INS B	AMB 40°C		

Tabla 3. Características del segundo motor bajo estudio.

MARELLI COMPONENTI ELETTROMECCANICI			1986
MOTOR 3Ø	MVTS63BX4B3	Δ	Y
60 Hz	Nr. 31P32846	332 V	575 V
0140 KW	1620 RPM	0.73 A	0.42 A

En las Figuras 3, 4 y 5 se observan las curvas obtenidas del equipo de adquisición de datos de la corriente en función del tiempo de cada una de las fases, sin la presencia de fallas del primer motor trifásico de inducción bajo estudio.

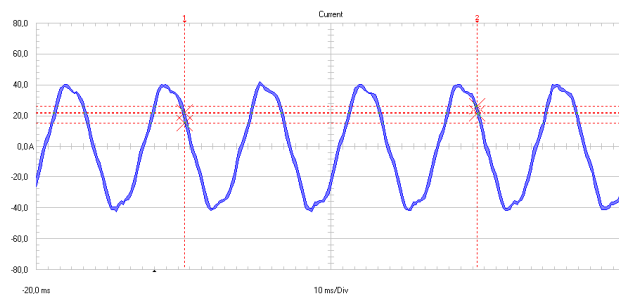


Figura 3. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 1 sin fallas.

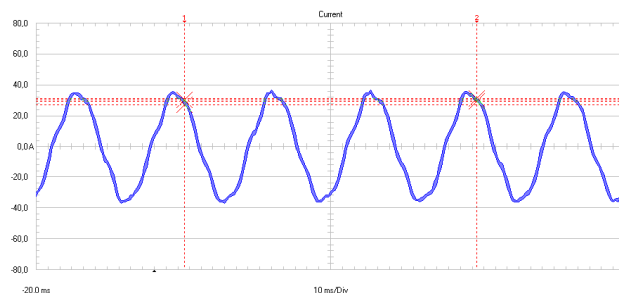


Figura 4. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 2 sin fallas.

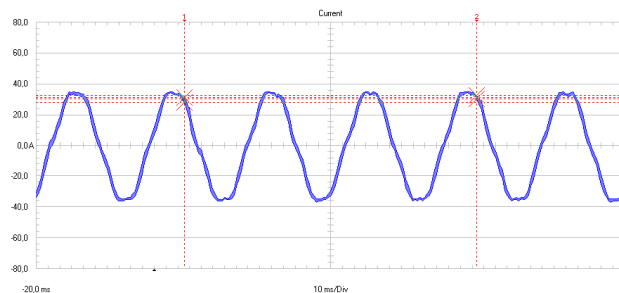


Figura 5. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 3 sin fallas.

Después de haber pasado los datos de cada una de las fases sin la presencia de fallas por el programa de la Transformada de Hilbert, se obtuvo las curvas de la corriente en función de la frecuencia en las Figuras 6, 7 y 8.

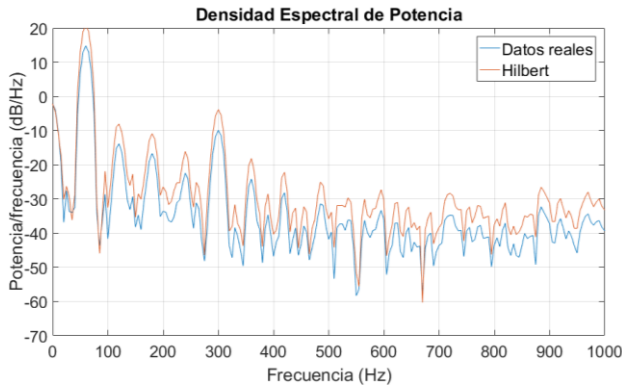


Figura 6. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 sin fallas.

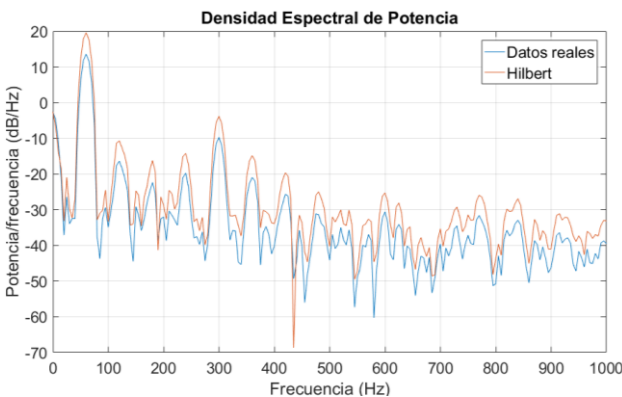


Figura 7. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 2 sin fallas.

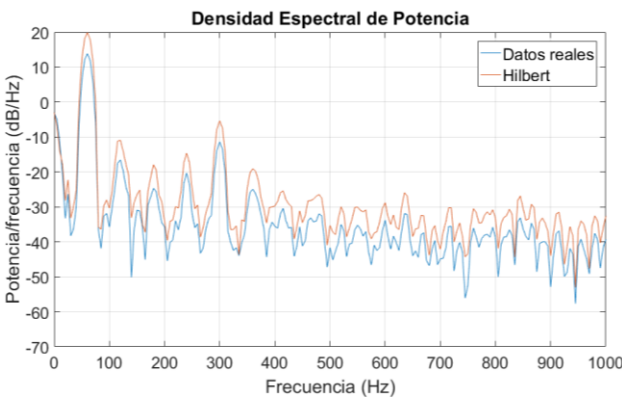


Figura 8. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 3 sin fallas.

Aplicando la ecuación (9) que corresponde a la falla ocasionada por espiras cortocircuitadas de la misma fase, al primer motor trifásico de inducción sin carga, a una velocidad de 3592 rpm y un deslizamiento de 0.0022, las pruebas arrojaron las frecuencias de falla que se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4. Frecuencias de falla de cortocircuito entre espiras.

M	K	1	1	2	3	3	5	4	7	5	9
Frec(+)	Hz	89,9		239,9		389,8		539,7		689,7	
Frec(-)	Hz	30,1		120,3		210,2		300,3		390,3	
M	K	6	11	7	13	8	15	9	17	10	19
Frec(+)	Hz	839,6		989,5		1139,5		1289,4		1439,3	
Frec(-)	Hz	480,4		570,5		660,5		750,6		840,7	

Comparando las frecuencias de falla de la FASE 2 y FASE 3 con las frecuencias obtenidas cuando el motor funciona bajo la condición sin falla, no existieron frecuencias destacadas, es decir las magnitudes que presentaron las frecuencias no son relevantes para una falla ocasionada por cortocircuito entre espiras, para considerar la frecuencia como falla debe tener una magnitud mayor de -20 DB por encima del nivel de ruido[31], razón por la cual no se mostraron en el estudio, por otro lado la FASE 1 si presento cambios distintivos los cuales se presentan en la Figura 9 con la curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1.

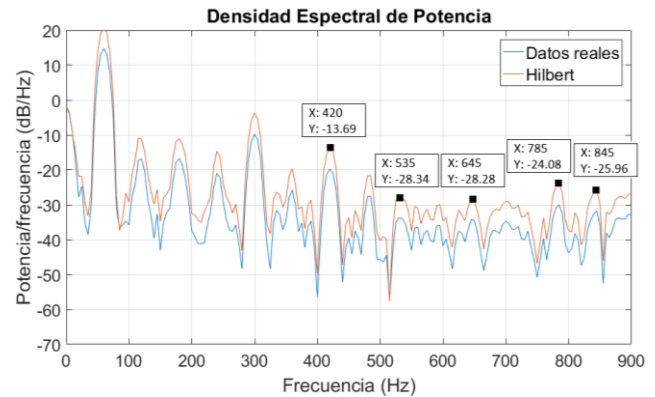


Figura 9. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por cortocircuito entre espiras.

En la Figura 8 se puede observar el espectro de frecuencia de la FASE 1 con varios picos de frecuencia, la mayoría con magnitudes de -20 DB por encima del nivel de ruido; las frecuencias relevantes para este caso son 120Hz, 180Hz, 240Hz, 300Hz, 360Hz, 420Hz, 480Hz, 535Hz, 645Hz, 785Hz, 845Hz.

Las componentes armónicas del espectro de frecuencia obtenidas en los estudios, presentan

diferencias en sus respectivas magnitudes las cuales se muestran en las Tablas 5 y 6:

Tabla 5. Componentes de frecuencia del motor sano.

Hz	120	180	240	300	360
DB	8,1	10,9	16	3,8	18,1
Hz	420	480	535	645	
DB	22	29,2	30	32	

Tabla 6. Frecuencias de falla del motor con espiras cortocircuitadas.

Hz	120	180	240	300	360	420
DB	11	11	15	3,7	19,7	14
Hz	480	535	645	785	845	
DB	22	28,3	28	24	26	

Como se puede observar en las Tablas 5 y 6, en las frecuencias de 420Hz, 535Hz y 645Hz, se nota un cambio significativo en el valor de sus respectivas magnitudes, también se evidencia que en la tabla de frecuencias del motor sano, a los 785Hz y 845Hz, no existen componentes armónicas de frecuencia, situación que cambia en el estudio del motor con la presencia de espiras cortocircuitadas, ya que la magnitud de estas frecuencias presentan valores de 24,08DB y 25,96DB respectivamente. Dichos resultados fueron los esperados y confirman la presencia de una falla de espiras cortocircuitadas de la misma fase en el funcionamiento del motor de inducción según la ecuación (9).

Aplicando la ecuación (3) que corresponde a la falla ocasionada por excentricidad, al primer motor trifásico de inducción sin carga, a una velocidad de 3592 rpm y un deslizamiento de 0.0022, las pruebas arrojaron las frecuencias de falla que se presentan en la Tabla 7:

Tabla 7. Frecuencias de falla de excentricidad.

K	1	3	5	7	9
Frec(+) Hz	89,9	149,8	209,7	269,5	329,4
Frec(-) Hz	30,1	29,8	89,7	149,5	209,4
K	11	13	15	17	19
Frec(+) Hz	389,27	449,13	509	568,9	628,73
Frec(-) Hz	269,27	329,13	389	448,9	508,73
K	21	23	25	27	29
Frec(+) Hz	688,6	748,47	808,33	868,2	929,1
Frec(-) Hz	568,6	628,47	688,33	748,2	808,1

Comparando las frecuencias de falla de la FASE 2 y FASE 3 con las frecuencias obtenidas cuando el motor funciona bajo la condición sin falla, no existieron frecuencias relevantes, razón por la cual no se mostraron en el estudio, por otro lado la FASE 1 si presento cambios distintivos los cuales se muestran en la Figura 10 con la curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1.

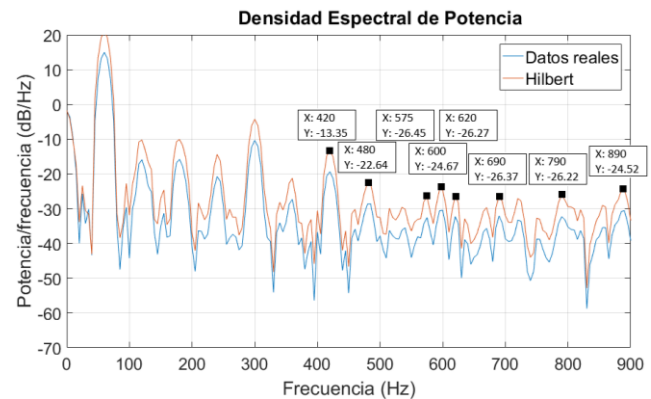


Figura 10. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por excentricidad.

En la Figura 10 se puede observar el espectro de frecuencia de la FASE 1 con varios picos de frecuencia, la mayoría con magnitudes de -20 DB por encima del nivel de ruido, las frecuencias relevantes para este caso son: 360Hz, 420Hz, 480Hz, 575Hz, 600Hz, 620Hz, 690Hz, 720Hz, 790Hz, 890Hz.

Las componentes armónicas del espectro de frecuencia obtenidas en los estudios presentan diferencias en sus respectivas magnitudes las cuales se muestran en las Tablas 8 y 9:

Tabla 8. Componentes de frecuencia del motor sano.

Hz	360	420	620	720	890
DB	18,12	22,19	31,32	28,34	27,79

Tabla 9. Frecuencias de falla del motor con excentricidad.

Hz	360	420	480	575	600
DB	21,25	13,35	22,64	26,45	24,67
Hz	620	690	720	790	890
DB	26,27	26,37	27	26,22	24,52

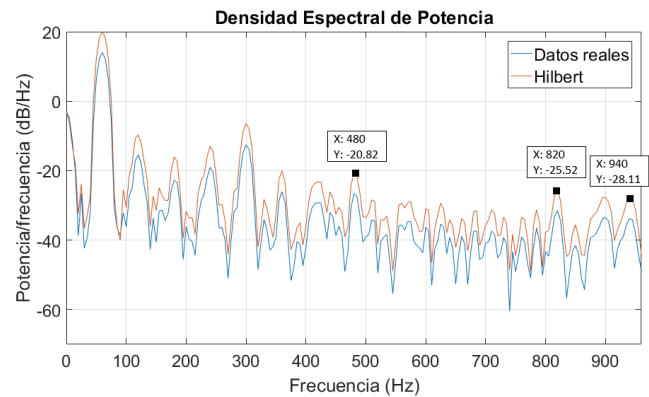
Como se puede observar en las Tablas 8 y 9, en las frecuencias de 420Hz, 620Hz y 890Hz, se nota un cambio significativo en el valor de sus respectivas magnitudes, también se evidencia que en la tabla de frecuencias del motor sano, a los 480Hz, 575Hz, 600Hz, 690Hz y 790Hz no existen componentes armónicas de frecuencia, situación que cambia en el estudio del motor con la presencia de falla por excentricidad ya que la magnitud de estas frecuencias presentan valores de 22,64DB, 26,45DB, 24,67DB, 26,37DB y 26,22DB respectivamente. Dichos resultados fueron los esperados y confirman la presencia de una falla causada por excentricidad en el funcionamiento del motor de inducción según la ecuación (3).

Aplicando las ecuaciones (5) y (7) que corresponden a la falla ocasionada por cojinetes dañados, al primer motor trifásico de inducción sin carga, a una velocidad de 3592 rpm y un deslizamiento de 0.0022, se modificó la uniformidad de las bolas del cojinete o también llamado rodamiento, lo cual imitó un desgaste. Las pruebas arrojaron las frecuencias de falla que se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10. Frecuencias de falla por cojinetes dañados.

K	1	2	3	48
Frec(+) Hz	437,89	815,78	1193	552,8
Frec(-) Hz	317,89	695,78	1037	432,8
K	56	64	78	87
Frec(+) Hz	634,93	717,07	860,8	953,2
Frec(-) Hz	514,93	597,07	740,8	833,2

Comparando las frecuencias de falla de la FASE 2 y FASE 3 con las frecuencias obtenidas cuando el motor funciona bajo la condición sin falla, no existieron frecuencias relevantes por lo cual no se mostraron en el estudio, por otro lado la FASE 1 si presento cambios distintivos los cuales se presentan en la Figura 11 con la curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1.

**Figura 11.** Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por cojinetes dañados.

En la Figura 10 se puede observar el espectro de frecuencia de la FASE 1 con varios picos de frecuencia, la mayoría con magnitudes de -20 DB por encima del nivel de ruido, las frecuencias relevantes para este caso son: 360Hz, 420Hz, 480Hz, 575Hz, 600Hz, 620Hz, 690Hz, 720Hz, 790Hz, 890Hz.

Las componentes armónicas del espectro de frecuencia obtenidas en los estudios presentan diferencias en sus respectivas magnitudes las cuales se muestran en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11. Componentes de frecuencia del motor sano.

Hz	360	420	480	720	885
DB	18,12	22,19	29,24	28,34	26,53

Tabla 12. Frecuencias de falla del motor con cojinetes dañados.

Hz	360	420	480	820	900	940
DB	19,98	23,21	20,82	25,52	27,67	28

Como se puede observar en las Tablas 11 y 12 en la frecuencia de 480Hz se nota un cambio significativo en el valor de su magnitudes, también se evidencia que en la tabla de

frecuencias del motor sano, a los 820Hz y 940Hz no existen componentes armónicas de frecuencia, situación que cambia en el estudio del motor con la presencia de falla por cojinetes dañados ya que la magnitud de estas frecuencias presentan valores de 25,52DB y 28,11DB respectivamente. Dichos resultados fueron los esperados y confirman la presencia de una falla causada por cojinetes dañados en el funcionamiento del motor de inducción según la ecuación (4) y la ecuación (7).

En las Figuras 12, 13 y 14 se puede observar las curvas obtenidas del equipo de adquisición de datos de la corriente en función del tiempo de cada una de las fases, sin la presencia de fallas del segundo motor trifásico de inducción bajo estudio.

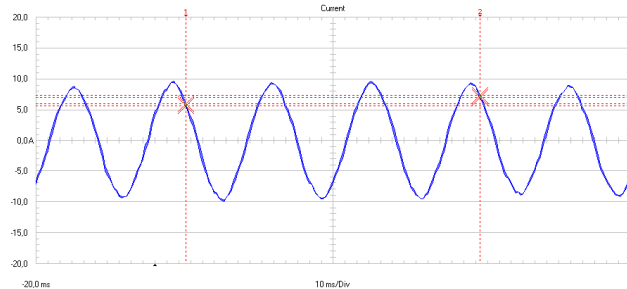


Figura 12. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 1 sin fallas.

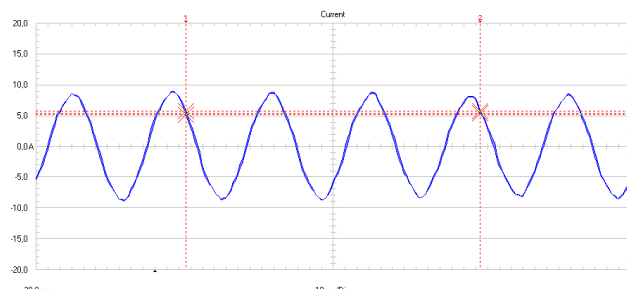


Figura 13. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 2 sin fallas.

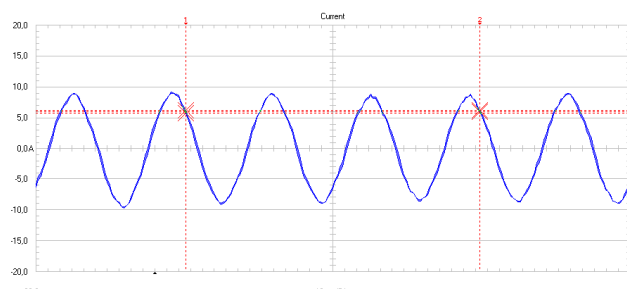


Figura 14. Curva de corriente en función del tiempo de la Fase 3 sin fallas.

Después de haber pasado los datos de cada una de las fases sin la presencia de fallas por el programa de la Transformada de Hilbert, se obtiene las curvas de la corriente en función de la frecuencia en las Figuras 15, 16 y 17.

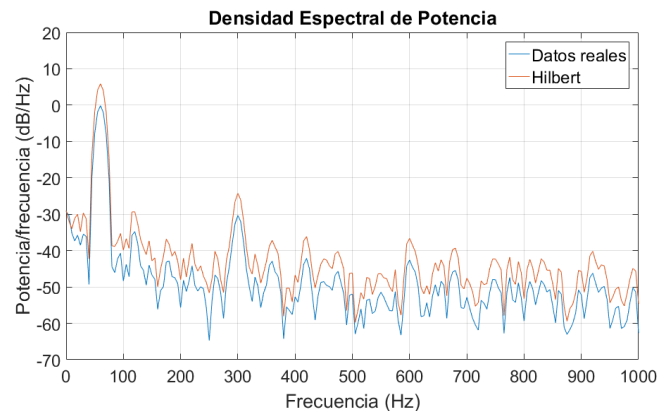


Figura 15. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 sin fallas.

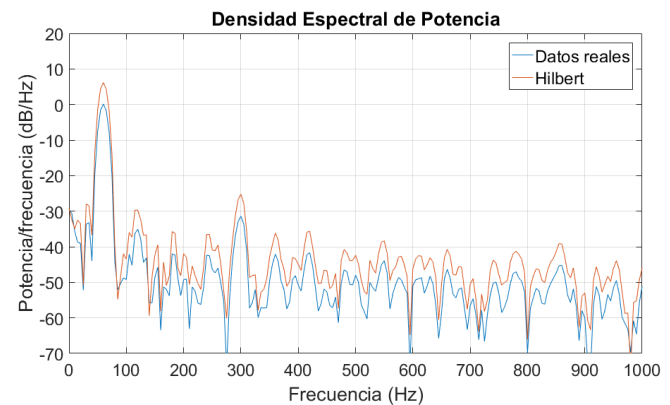


Figura 16. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 2 sin fallas.

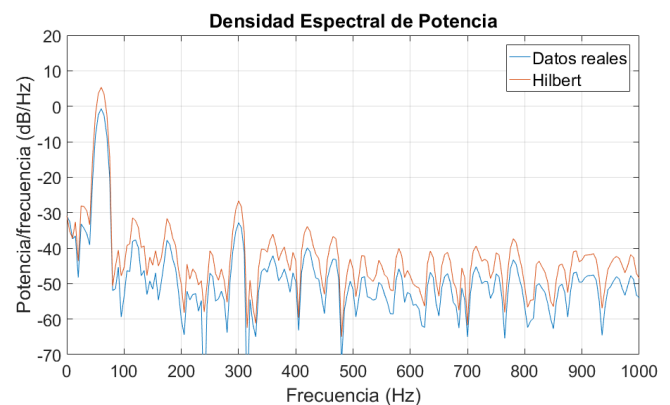


Figura 17. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 3 sin fallas.

Aplicando las ecuaciones (5) y (7) que corresponden a la falla ocasionada por barras rotas del rotor, al segundo motor trifásico de inducción, a una velocidad de 1646 rpm, un deslizamiento de 0.0855 y una carga del 79%, se taladraron orificios en las barras del rotor de 5mm de profundidad y de diámetro. Las pruebas arrojaron las frecuencias de falla que se presentan en la Tabla 13:

Tabla 13. Frecuencias de falla por barras rotas del rotor.

K	1	2	3	4	5
Frec(+) Hz	70,27	80,53	90,8	101,1	111,33
Frec(-) Hz	49,73	39,46	29,2	18,93	8,67
K	48	56	64	78	87
Frec(+) Hz	552,8	634,93	717,07	860,8	953,2
Frec(-) Hz	432,8	514,93	597,07	740,8	833,2

Comparando las frecuencias de falla de la FASE 2 y FASE 3 con las frecuencias obtenidas cuando el motor funciona bajo la condición sin falla, no existieron frecuencias relevantes por lo q no se mostraron en el estudio, por otro lado la FASE 1 si presento cambios distintivos los cuales se presentan en la Figura 18 con la curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1.

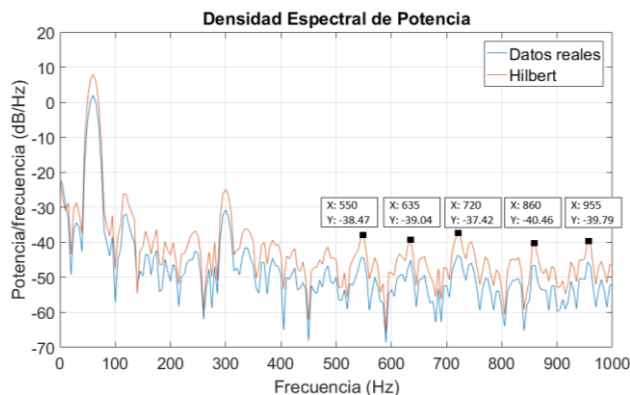


Figura 18. Curva de corriente en función de la frecuencia de la Fase 1 con falla por barras rotas.

En la Figura 18 se puede observar el espectro de frecuencia de la FASE 1 con varios picos de frecuencia, la mayoría con magnitudes de -20 DB por encima del nivel de ruido, las frecuencias relevantes para este caso son: 550Hz, 635Hz, 720Hz, 860Hz y 955Hz.

Las componentes armónicas del espectro de frecuencia obtenidas en los estudios presentan diferencias en sus respectivas magnitudes las cuales se muestran en las Tablas 14 y 15:

Tabla 14. Componentes de frecuencia del motor sano.

Hz	635	860
DB	-52,1	-44,9

Tabla 15. Frecuencias de falla del motor con barras rotas en el rotor.

Hz	550	635	720	860	955
DB	-38,5	-39	-37,4	-40,5	-39,8

Como se puede observar en las Tablas 14 y 15, en las frecuencias de 635Hz y 860Hz se nota un cambio significativo en el valor de sus magnitudes, también se evidencia que en la tabla de frecuencias del motor sano, a los 550Hz, 720Hz y 955Hz no existen componentes armónicas de frecuencia, situación que cambia en el estudio del motor con la presencia de falla por barras rotas del rotor, ya que la magnitud de estas frecuencias presentan valores de -38,47DB, -37,42DB y -39,8DB respectivamente según la ecuación (1). Dichos resultados fueron analizados restando los valores obtenidos de la magnitud de la frecuencia fundamental, la cual tiene un valor de 7,99DB, los que se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Magnitudes obtenidas de la diferencia entre la amplitud fundamental y las bandas laterales.

Hz	550	635	720	860	955
DB	46,46	47,03	45,41	48,45	47,78

Como se puede observar en la Tabla 16, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de 42DB a 48DB, de la Tabla 1 de la sección III, que corresponde a una falla causada por la presencia probable de barras rotas del rotor del motor de inducción.

6. Conclusiones

Este artículo presentó un estudio para la detección de fallas incipientes en los motores de inducción mediante la técnica del MCSA, utilizando la transformada de Hilbert, la técnica que corresponde a un análisis frecuencial de la corriente presento resultados correctos al analizar cada una de las 4 fallas incipientes, los resultados obtenidos fueron los esperados al momento de compararlos con patrones establecidos y se pudo confirmar la presencia de las fallas correspondientes en cada caso; el análisis de la falla causada por barras rotas en el rotor, fue el más complejo debido a que el motor debe funcionar con carga para que la técnica arroje resultados correctos, a mayor carga aplicada al motor, la velocidad de giro será menor, su deslizamiento aumentará y por ende la distancia entre el armónico fundamental y los armónicos laterales (2sf) será mayor, permitiendo que el estudio sea más exacto y la ubicación de las frecuencias representativas de la falla sea más eficaz. Con respecto a las tres fallas restantes, no existe mayor complejidad si se analiza el motor sin carga.

La frecuencia de muestreo por otro lado es un parámetro fundamental dentro del algoritmo de la transformada de Hilbert desarrollada en Matlab, por lo que su valor debe ser el correcto, ya que de esto dependerá la cantidad de datos que serán analizados por la transformada, los mismos que son obtenidos del equipo de medición y adquisición de datos.

Los resultados del presente artículo, permiten llegar a la conclusión de que la técnica del MCSA es un método muy eficaz al momento de analizar el comportamiento de la corriente de los motores de inducción, debido a que determina de manera exacta el estado en que se encuentran, permitiendo realizar mantenimientos preventivos en caso de ser necesario, evitando daños permanentes en la maquinaria y paros imprevistos.

7. Referencias

[1] R. Pérez, A. Aguila, and C. Vásquez,

- “Classification of the Status of the Voltage Supply in Induction Motors Using Support Vector Machines,” in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2016, pp. 1–5.
- [2] N. E. MORALES MARIÑO, “Diseño e Implementación de un Sistema de Detección de Barras Rotas en Motores de Inducción utilizando Algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA).,” Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [3] Y. Zhongming and W. Bin, “A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis,” in *IEEE Conference Publications*, 2000, pp. 1353–1358.
- [4] W. T. Thomson and M. Fenger, “Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults,” *IEEE Industry Applications Magazine*, no. August, 2001.
- [5] J.-H. Jung, J.-J. Lee, and B.-H. Kwon, “Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1842–1852, Dec. 2006.
- [6] M. E. . Benbouzid, “Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 4, pp. 454–459, 1999.
- [7] E. J. Wiedenbrug, S. Member, A. Ramme, S. Member, E. Matheson, A. Von Jouanne, and A. K. Wallace, “Modern Online Testing of Induction Motors for Predictive Maintenance and Monitoring,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 5, pp. 1466–1472, 2002.
- [8] W. Group, P. Systems, R. Subcommittee, E. Committee, I. Industry, and A. Society, “Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations , Part I,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. I, no. 4, 1985.
- [9] M. Reliability, W. Group, P. Systems, R. Subcommittee, E. Committee, I. Industry,

- and A. Society, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations , Part II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. I, no. 4, pp. 865–872, 1985.
- [10] A. Alwodai, F. Gu, and a D. Ball, "A Comparison of Different Techniques for Induction Motor Rotor Fault Diagnosis," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 364, p. 012066, May 2012.
- [11] P. P. Harihara, K. Kim, and A. G. Parlos, "Signal-Based versus Model-Based Fault Diagnosis- A Trade-off in Complexity and Performance," *Symposium on Diagnostics for Electric Machina, Power Electronics and Drives*, pp. 24–26, 2003.
- [12] E. T. Esfahani, S. Wang, and V. Sundararajan, "Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors," *IEEE/ASME Trans. MECHATRONICS*, pp. 1–9, 2013.
- [13] A. Soualhi, S. Member, G. Clerc, S. Member, and H. Razik, "Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4053–4062, 2013.
- [14] S. Nandi, H. A. Toliyat, S. Member, X. Li, and S. Member, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors — A Review," *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, 2005.
- [15] G. E. Global and D. Arvind, "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A Review," *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, pp. 3061–3066, 2006.
- [16] E. Ontario, "Stator Winding Monitoring," *IEEE Industry Applications Magazine*, no. October, 1998.
- [17] M. El, H. Benbouzid, and S. Member, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.
- [18] P. Pillay and Z. Xu, "Motor current signature analysis," *IAS '96. Conf. Rec. 1996 IEEE Ind. Appl. Conf. Thirty-First IAS Annu. Meet.*, vol. 1, 1996.
- [19] J. Antonio and O. Redondo, "Diagnóstico de motores de inducción mediante la adquisición de corrientes de estator con sonda Rogowski," Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.
- [20] H. W. Penrose, D. Ph, H. W. Penrose, and D. Ph, "Applications for Motor Current Signature Analysis," *ALL-TEST Pro*, 2004.
- [21] M. El, H. Benbouzid, S. Member, G. B. Kliman, and L. Fellow, "What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis ?," *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 18, no. 2, pp. 238–244, 2003.
- [22] W. Thomson and R. Gilmore, "Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, Data interpretation, and industrial case histories," *Proc. THIRTY-SECOND Turbomach. Symp.*, no. 1987, pp. 145–156, 2003.
- [23] A. F. Rico Maestre, "Detección de Fallas en un Motor de Inducción usando MCSA (Motor Current Signature Analysis).," Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [24] J. Rivera and H. Cevallos, "Diseño e Implementación en LabView de un Sistema de Diagnóstico de Fallas Rotóricas en un Motor de Inducción mediante el Análisis Espectral de la Corriente de Alimentación.," Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2012.
- [25] S. J. Oviedo, J. E. Quiroga, and G. Ordoñez Plata, "Validación Experimental de la Metodología Motor Current Signature Analysis para un Motor de Inducción de 2 HP," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 70, pp. 108–118, 2014.
- [26] M. M. Fernández, "Señales y Sistemas de

- Comunicación,” Universidad de Valladolid, 1998.
- [27] T. Cui, X. Dong, Z. Bo, and A. Juszczuk, “Hilbert-transform-based transient/intermittent earth fault detection in noneffectively grounded distribution systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 1, pp. 143–151, 2011.
 - [28] M. Rahman and M. N. Uddin, “Online Unbalanced Rotor Fault Detection of an IM Drive Based on Both Time and Frequency Domain Analyses,” in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2015, pp. 1–8.
 - [29] U. M.- Constantine, U. Henri, and P. Nancy, “Neutral Voltage Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Using Hilbert Transform Phase,” in *IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007, pp. 1940–1947.
 - [30] D. M. Yang, “Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Using Hilbert-Based Bispectral Analysis,” *2012 Int. Symp. Comput. Consum. Control*, pp. 385–388, Jun. 2012.
 - [31] V. M. Estudillo Piñero, “Diagnóstico de Motores Mediante Equipo PdMA,” Universidad Veracruzana, 2012.

8. Estado del Arte

Tabla 17. Matriz de estado del arte

DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN POR MCSA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE HILBERT																													
DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA						
ÍTEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS DEL ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS MEDIANTE PROCESOS DE MONITOREO "EN LINEA"	ANÁLISIS DE MOTORES MEDIANTE EL EQUIPO PMA	DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	FORMULACIÓN DE ALGORITMOS DE ANÁLISIS "EN LINEA"	DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS DEL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y MONITOREO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	CRITERIOS DE CONFIABILIDAD, ESTABILIDAD Y ESCALABILIDAD	CARGA OPERACIONAL DEL MOTOR DURANTE EL PORCESO DE ANÁLISIS	CONDICIONES FÍSICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DURANTE EL PROCESO DE ANÁLISIS	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL VOLTAJE	EXPERIMENTACIÓN	FORMULACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	FORMULACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER	MONITORIO MEDIANTE VARIADORES DE FRECUENCIA	ESTUDIO DE LOS ESTIMADORES DE FALLO	TRANSFORMADA DE HILBERT	MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	TRANSFORMADA DE FOURIER	INSTALACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA	APLICACIÓN DE ESTIMADORES DE FALLO	
1	2014	Diseño e Implementación de un Sistema de Detección de Barras Rotas en Motores de Inducción utilizando Algoritmos de Análisis Espectral de Corrientes (MCSA)	\cite{MORALES2014}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	2000	A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis	\cite{Zhongming2000}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2001	Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults	\cite{Thomson2001}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2006	Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA	\cite{Jung2006}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	1999	Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis	\cite{Benbouzid1999}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2002	Modern Online Testing of Induction Motors for Predictive Maintenance and Monitoring	\cite{Wiedenbrug2002}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	1985	Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations , Part I	\cite{WorkingGroup1985}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	1985	Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations , Part II	\cite{WorkingGroup1985}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	2012	A Comparison of Different Techniques for Induction Motor Rotor Fault Diagnosis	\cite{Alwodai2012}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	2003	Signal-Based versus Model-Based Fault Diagnosis- A Trade-off in Complexity and Performance	\cite{Harihara2003}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	2013	Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors	\cite{Esfahani2013}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN POR MCSA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE HILBERT

DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA									
ÍTEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS DEL ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS MEDIANTE PROCESOS DE MONITOREO "EN LINEA"	ANÁLISIS DE MOTORES MEDIANTE EL EQUIPO PdMA	DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DEL METODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	FORMULACIÓN DE ALGORITMOS DE ANÁLISIS "EN LINEA"	DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS DEL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y MONITOREO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	CRITERIOS DE CONFIABILIDAD, ESTABILIDAD Y ESCALABILIDAD	CARGA OPERACIONAL DEL MOTOR DURANTE EL PORCESO DE ANÁLISIS	CONDICIONES FÍSICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DURANTE EL PROCESO DE ANÁLISIS	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL VOLTAJE	EXPERIMENTACIÓN	FORMULACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	TRANSFORMADA DE FOURIER	MONITOREO MEDIANTE VARIADORES DE FRECUENCIA	ESTUDIO DE LOS ESTIMADORES DE FALLO	TRANSFORMADA DE HILBERT	MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	TRANSFORMADA DE FOURIER	INSTALACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA	APLICACIÓN DE ESTIMADORES DE FALLO	
12	2013	Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique	\cite{Soualhi2013}	✗	□	□	✗	□	✗	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□
13	2005	Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors — A Review	\cite{Nandi2005}	✗	✗	□	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□
14	2006	Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A Review	\cite{Gloval2006}	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□
15	1998	Stator Winding Monitoring	\cite{Ontario1998}	□	✗	✗	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□
16	2000	A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection	\cite{Benbouzid2000}	✗	✗	□	□	□	✗	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	✗	□
17	1996	Motor current signature analysis	\cite{Pillay1996}	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□
18	2008	Diagnóstico de motores de inducción mediante la adquisición de corrientes de estator con sonda Rogowski	\cite{Antonio2008}	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	□	✗	✗	□	✗	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	✗
19	2004	Applications for Motor Current Signature Analysis	\cite{Penrose2004}	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	□
20	2003	What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis?	\cite{Benbouzid2003}	□	□	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□
21	2003	Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, Data interpretation, and industrial case histories	\cite{Thomson2003}	✗	✗	□	□	□	✗	✗	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□
22	2011	Detección de Fallas en un Motor de Inducción usando MCSA (Motor Current Signature Analysis)	\cite{Rico2011}	✗	✗	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	✗	□
23	2012	Diseño e Implementación en LabView de un Sistema de Diagnóstico de Fallas Rotóricas en un Motor de Inducción mediante el Análisis Espectral de la Corriente de Alimentación.	\cite{Rivera2012}	□	✗	✗	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□

DIAGNÓSTICO DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN POR MCSA UTILIZANDO LA TRANSFORMADA DE HILBERT

DATOS		TEMÁTICA	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA												
ÍTEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES EN MOTORES DE INDUCCIÓN	MÉTODO DE ANALISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS DEL ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS MEDIANTE PROCESOS DE MONITOREO "EN LÍNEA"	ANÁLISIS DE MOTORES MEDIANTE EL EQUIPO PdMA	DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	FORMULACIÓN DE ALGORITMOS DE ANÁLISIS "EN LÍNEA"	DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS DEL ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y MONITOREO DE MOTORES DE INDUCCIÓN	CRITERIOS DE CONFIABILIDAD, ESTABILIDAD Y ESCALABILIDAD	CARGA OPERACIONAL DEL MOTOR DURANTE EL PORCESO DE ANÁLISIS	CONDICIONES FÍSICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DURANTE EL PROCESO DE ANÁLISIS	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL VOLTAJE	EXPERIMENTACIÓN	FORMULACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DEL MÉTODO DE ANALISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	FORMULACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER	MONITOREO MEDIANTE VARIADORES DE FRECUENCIA	ESTUDIO DE LOS ESTIMADORES DE FALLO	TRANSFORMADA DE HILBERT	MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL MOTOR	TRANSFORMADA DE FOURIER	INSTALACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA	APLICACIÓN DE ESTIMADORES DE FALLO		
24	2014	Validación Experimental de la Metodología Motor Current Signature Analysis para un Motor de Inducción de 2 HP	\cite{Oviedo2014}	✖	✖	✖	□	□	✖	✖	□	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□
25	1998	Señales y Sistemas de Comunicación.	\cite{Fernández1998}	□	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□
26	2011	Hilbert-transform-based transient/intermittent earth fault detection in noneffectively grounded distribution systems	\cite{Cui2011}	□	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□
27	2015	Online Unbalanced Rotor Fault Detection of an IM Drive Based on Both Time and Frequency Domain Analyses	\cite{Rahman2015}	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	✖	□	□
28	2007	Neutral Voltage Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Using Hilbert Transform Phase	\cite{Constantine2007}	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□
29	2012	Induction Motor Bearing Fault Diagnosis Using Hilbert-Based Bispectral Analysis	\cite{Yang2012}	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□
30	2012	Diagnóstico de Motores Mediante Equipo PdMA	\cite{Estudillo2012}	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	
31	2016	Classification of the Status of the Voltage Supply in Induction Motors Using Support Vector Machines	\cite{Pérez2016}	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	
CANTIDAD:			19	14	9	13	1	19	14	7	8	11	11	18	10	7	20	8	17	6	4	3	7	17	5	5	3			

Tabla 18. Resumen e Indicadores del estado del arte

